

И.К. Гималтдинов, И.Г. Хусаинов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ГИДРАТА В
ПОРИСТОЙ СРЕДЕ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Изучено распространение акустических волн в пористой среде, скелет которой представляет собой газовый гидрат, а поры заполнены водой. Записана система уравнений, описывающая распространение акустических волн в такой пористой среде. Получено дисперсионное уравнение, на основе которого проанализированы фазовая скорость звука и декремент затухания акустических волн. Выведены и исследованы коэффициенты отражения и прохождения на границах «жидкость–пористая среда» и «пористая среда – жидкость». На основе дисперсионного уравнения, соответствующих коэффициентов отражения и прохождения исследовано распространение импульсов конечной длительности в пористой среде. Показана ~~Установлена~~ возможность оценки толщины газогидратного пласта с помощью акустических волн.

Ключевые слова: акустические волны, пористая среда, газовый гидрат, дисперсионное соотношение, коэффициенты отражения и прохождения, быстрое преобразование Фурье

Введение. Природные газовые гидраты, являющиеся перспективными источниками углеводородного сырья, образуются в глубоководных осадках морей и океанов и в районах вечной мерзлоты. Они представлены в основном углеводородными газами, чаще всего – метаном. Выполненные оценки запасов углеводородов в газогидратном состоянии дают значения, значительно превышающие общие ресурсные показатели всех других горючих полезных ископаемых [1].

Наряду с исследованиями, посвященными способам и методам добычи газа, заключенного в составе газогидратов [2 – 8], существует ряд задач, связанных с обнаружением и образованием газовых гидратов, а также хранением газа в гидратном состоянии в подземных резервуарах [9 – 15]. Вместе с тем в отраслях промышленности, связанных с процессами добычи, переработки и транспортировки природного газа, сталкиваются с проблемами образования газогидратов в трубопроводах и магистральных, что приводит к необходимости разработки соответствующих мер борьбы с такими газогидратными отложениями и разработке мер по их профилактике [16 – 18].

С целью разведки, а также мониторинга и контроля процессов гидратообразования в пористых средах, можно использовать акустические методы, т.к. наличие гидрата в порах среды приводит к изменению ее акустических свойств. Таким образом, изменения в плотности осадочных пород и скорости распространения в них акустических волн при наличии гидратов создает предпосылки для выявления зон образования газогидратов акустическими методами и поэтому акустические измерения могут быть главным источником информации, на основании которой проводят идентификацию и количественную оценку местонахождения гидратов в донных отложениях.

При моделировании распространения акустических волн в донных отложениях может потребоваться использование более сложных структурно-аналитических моделей газогидратных пластов, т.к. в осадочной толще газогидраты распространены крайне неравномерно, а встречаемые структурные аномалии могут иметь разные масштабы [19].

Процессам распространения акустических волн в насыщенных пористых средах посвящено большое количество работ [20 – 29]. В них предложен ряд моделей, как позволяющих на основе свойств сред прогнозировать распространение акустических волн в них, так и по изучению

характера распространения волн в средах с изучаемой геометрией ответить на вопрос о составе и строении таких сред.

В данной работе рассмотрена динамика акустических волн при распространении в пористой среде, скелет которой образован газовым гидратом, а поры среды заполнены водой (пористый гидрат). Кроме того, изучается эволюция волнового импульса при прохождении через пористый гидрат.

Постановка задачи и основные уравнения. Рассмотрим пористую среду, первая часть которой насыщена водой, а во второй части поры полностью заполнены газовым гидратом. В качестве характерных параметров, определяющих среду, возьмем средний радиус пор a_0 и среднюю полутолщину стенок пор b_0 [24]. Длина части пористой среды, насыщенной водой, равна l .

Для описания распространения акустических волн в части пористой среды, насыщенной водой, примем следующее допущение: длина волн намного больше размеров пор.

Уравнения баланса массы и импульса для скелета пористой среды и воды в рамках двухскоростного приближения, в линеаризованном виде для рассматриваемой задачи имеют вид [30, 31]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \rho_{j0} \frac{\partial v_j}{\partial x} &= 0, \\
 \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial x} - \frac{\partial p_l}{\partial x}, \\
 \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial t} &= -\alpha_{l0} \frac{\partial p_l}{\partial x} - F, \quad F = F_m + F_\mu + F_B, \\
 F_m &= \frac{1}{2} \eta_m \alpha_{l0} \alpha_{h0} \rho_l^0 \left(\frac{\partial v_l}{\partial t} - \frac{\partial v_s}{\partial t} \right), \\
 F_\mu &= \frac{9}{2} \eta_\mu \alpha_{l0} \alpha_{s0} u_l (v_l - v_s) a_0^{-2}, \\
 F_B &= 6 \eta_B \alpha_{l0} \alpha_{s0} a_0^{-1} \sqrt{\pi \rho_l^0 u_l} \int_{-\infty}^t \frac{\partial}{\partial \tau} (v_l - v_s) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь ρ_j и v_j – плотность и скорость j -й фазы, p_l – давление в жидкой фазе (воде), α_s и α_l – объёмные содержания скелета и воды соответственно, σ_s^* – эффективное напряжение в скелете, F_m – сила присоединённых масс, вызванная инерционным взаимодействием фаз, F_B – аналог силы Бассэ, проявляющейся при высоких частотах из-за нестационарности вязкого пограничного слоя около границы с твёрдой фазой, F_μ – аналог силы вязкого трения Стокса, μ_l – динамическая вязкость воды, η_m, η_μ, η_B – безразмерные коэффициенты, зависящие от параметров пористой среды. Нижний индекс $j=s, l$ будем относить к параметрам скелета и воды в порах. Дополнительным индексом (0) внизу снабжены параметры, соответствующие невозмущенному состоянию, а параметры без этого индекса выражают малые возмущения параметров от равновесного значения; верхний индекс (0) соответствует истинному значению параметра.

Положим, что скелет пористой среды является упругим. Для скелета уравнение состояния примем в акустическом приближении:

$$\sigma_s^* = \alpha_s (3\lambda_s + 2\mu_s) \varepsilon + \alpha_s \phi p_l, \quad \phi = \frac{\lambda_s + 2\mu_s/3}{\rho_{s0}^0 C_s^2}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial x}, \quad (2)$$

$$p_s - p_{s0} = C_s^2 (\rho_s^0 - \rho_{s0}^0), \quad \sigma_s^* = \alpha_s (p_s - p_l),$$

где $\alpha_s \lambda_s$ и $\alpha_s \mu_s$ – модули упругости скелета пористой среды, C_s – скорость звука в пористой среде.

Воду, заполняющую поры среды, примем акустически сжимаемой:

$$p_l - p_{l0} = C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad (3)$$

где C_l скорость звука в жидкости.

Для истинных плотностей ρ_j и объёмных содержаний α_j справедливы следующие кинематические соотношения:

$$\rho_j = \alpha_j \rho_j^0, \quad \alpha_{l0} = \frac{a_0^3}{(a_0 + b_0)^3}, \quad \alpha_l + \alpha_s = 1. \quad (4)$$

Решение системы уравнений (1) – (4) будем искать в виде затухающих бегущих волн:

$$\rho_j^0, v_j, p_l, \sigma_s, \alpha_j \cong \exp[i(Kx - \omega t)], \quad K = k + i\delta, \quad \tilde{N}_p = \frac{\omega}{k}, \quad (5)$$

где ω – круговая частота, K – комплексное волновое число, C_p – фазовая скорость волны, δ – коэффициент затухания.

Из условия существования решения вида (5), после ряда преобразований, получаем следующее дисперсионное соотношение:

$$\frac{K}{\omega} = \pm \frac{1}{C_l \sqrt{2}} \sqrt{B_1 + B_2 \tilde{C}^2 \pm \sqrt{(B_1 + B_2 \tilde{C}^2)^2 - 4B_3 \tilde{C}^2}}, \quad (6)$$

$$B_1 = 1 + i\chi_V \alpha_{s0}, \quad B_2 = 1 - (1 + i\alpha_{s0}\chi_V) \beta (\tilde{Q} - 1) \alpha_{s0} / \alpha_{l0} + i\chi_V (1 - \alpha_{s0}\tilde{Q}) \beta, \quad \beta = \frac{\rho_{l0}^0}{\rho_{s0}^0}, \quad \tilde{N} = \frac{\tilde{N}_l}{C_s},$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_{s0}^0}}, \quad B_3 = \beta (1 - \tilde{C}^2 (\tilde{Q} - 1) \alpha_{s0} / \alpha_{l0}) (1 + i\chi_V (\alpha_{s0} + \beta \alpha_{l0})), \quad \chi_V = \frac{1}{\omega \tau^*},$$

$$\tau^{*-1} = \frac{1}{2} \left(-i\omega \eta_m + 9\eta_\mu \nu_l a_0^{-2} + \frac{9}{2} \eta_B (1 - i) a_0^{-1} \sqrt{2\nu_l \omega} \right), \quad \nu_l = \frac{\mu_l}{\rho_{l0}^0}.$$

Здесь коэффициент χ_V учитывает влияние нестационарных сил межфазного взаимодействия между скелетом и водой на динамику «быстрой» и «медленной» волн, распространяющихся в пористой среде.

Используя полученное дисперсионное уравнение, рассмотрим следующую задачу. Пусть на дне водоема расположен слой пористого газового гидрата толщиной l , поры которого заполнены водой. Будем полагать, что граница $x=0$ является границей между водой и пористым гидратом. На границе $x=l$ пористый гидрат соприкасается с песчаником низкой пористостью и большим коэффициентом упругости, чем коэффициент упругости гидрата. На границу раздела «вода–пористый гидрат» падает волна. Будем полагать, что волновой вектор перпендикулярен плоской поверхности пористого газового гидрата (при $x=0$). Известно, что возмущение в пористой среде приобретает двух волновую структуру [1, 2],

т.е. распадается на две волны: «быструю» (деформационную) и «медленную» (фильтрационную).

Запишем следующие условия на границе $x=0$ («вода – пористая среда, насыщенная водой»):

1) непрерывность давления на границе

$$p_e = p_l, \quad (7)$$

2) непрерывность нормальной компоненты усредненной по объему скорости на границе

$$v_e = \alpha_{l0} v_l + \alpha_{s0} v_s, \quad (8)$$

3) равенство сил, действующих на единицу площади поверхности (т.е. суммарные напряжения), по обе стороны от этой поверхности

$$p_e = -\sigma_s^* + p_l. \quad (9)$$

Здесь индекс e относится к параметрам окружающей пласт среды.

Используя граничные условия (7) – (9), можно получить следующие выражения для коэффициентов отражения $(N^{(wp)})$ и прохождения «медленной» $(M_b^{(wp)})$ и «быстрой» $(M_a^{(wp)})$ волн через границу «вода – пористая среда, насыщенная водой»:

$$M_b^{(wp)} = \frac{2(1+z_a)}{z_a - z_b + \rho_{l0}^0 C_l (\psi_b (1+z_a) - \psi_a (1+z_b))},$$

$$M_a^{(wp)} = \frac{2(1+z_b)}{z_b - z_a - \rho_{l0}^0 C_l (\psi_b (1+z_a) - \psi_a (1+z_b))}, \quad (10)$$

$$N^{(wp)} = M_b^{(wp)} + M_a^{(wp)} - 1, \quad (x=0).$$

Здесь верхний индекс (wp) соответствует границе «вода – пористая среда, насыщенная водой» (*water – porous saturated with water*). Параметры ψ_j , C_j , z_j определяются из выражений

$$\psi_j = \alpha_{l0} Q_j + \alpha_{s0} H_j, \quad C_j = \omega / K_j, \quad z_j = \alpha_{s0} \tilde{Q} + \alpha_{s0} H_j \rho_{s0}^0 C_s^2 / C_j,$$

$$H_j = \frac{-B_1(\alpha_{s0}\tilde{Q} - 1) - \alpha_{s0}}{C_j \left[B_1 \rho_{s0}^0 \alpha_{s0} (1 - C_s^2 / C_j^2) + \rho_{l0}^0 \alpha_{l0} \alpha_{s0} i \chi_V \right]},$$

$$Q_j = (1/C_j + i H_j \rho_{l0}^0 \alpha_{s0} \chi_V) / \rho_{l0}^0 B_1, j = a, b.$$

После прохождения первой границы ($x=0$) «быстрая» и «медленная» волны распространяются по пористой среде и доходят до границы «пористая среда, насыщенная водой – пористая среда, насыщенная гидратом» (*porous saturated with water – hydrate-saturated porous medium*) и отражаются.

Граничные условия при $x=l$ определяются из следующих формул:

1) непрерывность нормальной компоненты усредненной по объему скорости на поверхности раздела:

$$v_{hp} = \alpha_{g0} v_g + \alpha_{s0} v_s, \quad (11)$$

2) отсутствие относительного движения воды в порах и скелета

$$v_l - v_s = 0, \quad (12)$$

3) равенство сил, действующих на единицу площади поверхности (т.е. суммарные напряжения), по обе стороны от этой поверхности:

$$p_{hp} = -\sigma_s^* + p_l. \quad (13)$$

Здесь p_{hp} и v_{hp} – эффективное напряжение и скорость движения пористой среды, насыщенной гидратом.

При отражении «медленной» волны от границы $x=l$ в пористой среде, насыщенной водой, возникают «медленная» и «быстрая» волны с коэффициентами отражения $N_{bb}^{(hp)}$ и $N_{ba}^{(hp)}$. При этом коэффициент прохождения «медленной» волны через эту границу один – $M_b^{(hp)}$.

Из граничных условий (11)–(13) получим следующие формулы для коэффициентов отражения и прохождения «медленной» и «быстрой» волн через границу «пористая среда, насыщенная водой – пористая среда, насыщенная гидратом»:

$$N_{bb}^{(hp)} = \frac{\rho_{sh}^0 C_{sh} (H_b + d_0 H_a) - d_0 (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a) + \alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_b}{\rho_{sh}^0 C_{sh} (H_b + d_1 H_a) - d_1 (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a) + \alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_b},$$

$$N_{ba}^{(hp)} = d_1 \frac{\rho_{sh}^0 C_{sh} (H_b + d_0 H_a) - d_0 (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a) + \alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_b}{\rho_{sh}^0 C_{sh} (H_b + d_1 H_a) - d_1 (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a) + \alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_b} + d_0, \quad (14)$$

$$M_b^{(hp)} = \rho_{sh}^0 C_{sh} (H_b - N_{ba}^{(hp)} H_a - N_{bb}^{(hp)} H_b).$$

Где параметры d_1 и d_0 определяются по формулам

$$d_1 = \frac{Q_b - H_b}{Q_a - H_a}, \quad d_0 = \frac{Q_b - H_b}{Q_a - H_a}.$$

Аналогично, при отражении «быстрой» волны от границы $x=l$ в пористой среде, насыщенной водой, возникают «медленная» и «быстрая» волны с коэффициентами отражения $N_{ab}^{(hp)}$ и $N_{aa}^{(hp)}$. Коэффициент прохождения «быстрой» волны – $M_a^{(hp)}$.

$$N_{ab}^{(hp)} = \frac{\rho_{sh}^0 C_{sh} (H_a + d_0 H_b) - (1 + d_0) (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a)}{\rho_{sh}^0 C_{sh} (H_b + d_1 H_a) - d_1 (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a) + \alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_b},$$

$$N_{aa}^{(hp)} = \frac{\rho_{sh}^0 C_{sh} d_1 (H_a + d_0 H_b) - (1 + d_0) (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a)}{\rho_{sh}^0 C_{sh} (H_b + d_1 H_a) - d_1 (\alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_a) + \alpha_{l0} - \alpha_{s0} z_b} + d_0, \quad (15)$$

$$M_a^{(hp)} = \rho_{sh}^0 C_{sh} (H_a - N_{aa}^{(hp)} H_a - N_{ab}^{(hp)} H_b).$$

В дальнейшем, отразившись от границы «пористая среда, насыщенная водой – пористая среда, насыщенная гидратом», «медленная» и «быстрая» волны распространяются в обратном направлении и переходят границу «пористая среда, насыщенная водой – вода». Коэффициенты прохождения «медленной» и «быстрой» волн через эту границу определяются по формулам:

$$M_b^{(pw)} = (1 + T_1/T_2)(1 - z_b/z_a),$$

$$M_a^{(pw)} = 2\psi_a/T_2(1 - z_a/z_b),$$

$$T_1 = \psi_a + \psi_b z_a/z_b + 1/C_e \rho_{e0}^0, \quad T_2 = \psi_b z_a/z_b - \psi_a - 1/C_e \rho_{e0}^0.$$

Верхний индекс (pw) соответствует границе «пористая среда, насыщенная водой – вода» (*porous saturated with water – water*).

На основе полученных выражений для коэффициентов отражения и прохождения волны на границах $x=0$ и $x=l$, рассмотрим динамику волны конечной длительности при ее отражении от границы «пористая среда, насыщенная водой – пористая среда, насыщенная гидратом». Пусть импульс колоколообразной формы, описываемый выражением

$$p^{(0)}(0,t) = \Delta P_0 \exp \left[- \left(\frac{t - t_m}{t_*} \right)^2 \right], \quad (16)$$

где t – время, t_m и t_* полуширина импульса и характерный временной параметр, падает со стороны воды на границу «вода – пористый гидрат». Тогда, для отраженного и проходящего через границу ($x=0$) сигналов, используя преобразование Фурье, можем записать

$$p^{(r)}(0,t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p^{(0)}(0,\tau) N^{(wp)}(\omega) \exp(i\omega(t - \tau)) d\omega d\tau, \quad (17)$$

$$p_a^{(t)}(0,t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p^{(0)}(0,\tau) M_a^{(wp)}(\omega) \exp(i\omega(t - \tau)) d\omega d\tau, \quad (18)$$

$$p_b^{(t)}(0,t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p^{(0)}(0,\tau) M_b^{(wp)}(\omega) \exp(i\omega(t - \tau)) d\omega d\tau. \quad (19)$$

Формула (17) позволяет построить отраженный от границы «вода – пористый гидрат» импульс давления. С помощью формул (18) и (19) можно получить образовавшиеся в пористой среде «быструю» и «медленную» волны.

На втором этапе, в предположении, что в пористой среде распространяются две волны («медленная» и «быстрая»), эволюция этих сигналов описываются выражениями

$$p_a^+(x,t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p^{(0)}(0,\tau) M_a^{(wp)}(\omega) \exp(i\omega(t - \tau) + iK_a x) d\omega d\tau, \quad (20)$$

$$p_b^+(x,t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p^{(0)}(0,\tau) M_b^{(wp)}(\omega) \exp(i\omega(t - \tau) + iK_b x) d\omega d\tau. \quad (21)$$

Здесь $p_a^+(x, t)$ и $p_b^+(x, t)$ - распространяющиеся от границы $x=0$ к границе $x=l$ «быстрая» и «медленная» волны.

Согласно коэффициентов отражения и прохождения «медленной» и «быстрой» волн (15) и (16) от границы «пористый гидрат–песчаник» ($x=l$) полностью отражаются. Отраженные от границы $x=l$ волны можно получить по формулам

$$p_a^{(r)}(l, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p_a^+(l, \tau) N_a^{(s)}(\omega) \exp(i\omega(t - \tau)) d\omega d\tau, \quad (16)$$

$$p_b^{(r)}(l, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p_b^+(l, \tau) N_b^{(s)}(\omega) \exp(i\omega(t - \tau)) d\omega d\tau. \quad (17)$$

После отражения от границы «пористый гидрат–песчаник» «быстрая» и «медленная» волны $p_a^-(x, t)$ и $p_b^-(x, t)$ распространяются к границе $x=0$. Эти волны описываются с помощью формул:

$$p_a^-(x, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p_a^{(r)}(l, \tau) \exp(i\omega(t - \tau) + iK_a(l - x)) d\omega d\tau, \quad (18)$$

$$p_b^-(x, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty p_b^{(r)}(l, \tau) \exp(i\omega(t - \tau) + iK_b(l - x)) d\omega d\tau. \quad (19)$$

Дойдя до границы «пористый гидрат – вода», волны $p_a^-(x, t)$ и $p_b^-(x, t)$ частично проходят через эту границу и частично отражаются. Импульс, прошедший через границу «пористый гидрат – вода», можно определить с помощью выражения:

$$p^{(pw)}(0, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty [p_a^-(0, \tau) M_a^{(pw)}(\omega) + p_b^-(0, \tau) M_b^{(pw)}(\omega)] \exp(i\omega(t - \tau)) d\omega d\tau. \quad (20)$$

Скорости распространения «быстрой» и «медленной» волн разные. Поэтому эти волны расстояние от границы $x=0$ к границе $x=l$ ($p_a^+(x, t)$ и $p_b^+(x, t)$) и обратно ($p_a^-(x, t)$ и $p_b^-(x, t)$) проходят за разное время. Зная скорости этих волн и время прохождения волн от границы $x=0$ к границе $x=l$ и обратно, можно определить толщину газогидратного пласта.

Результаты расчета. По дисперсионному соотношению (6) рассчитаны фазовая скорость и коэффициент затухания для обоих типов волн.

Параметры фаз взяты при температуре среды 277 К и давлении $p_0 = 100$ атм. Скелет пористой среды имеет следующие физические характеристики: $\rho_{s0}^0 = 2700 \text{ кг/м}^3$, $E_s = 35 \text{ ГПа}$; параметры гидрата: $\rho_{h0}^0 = 914 \text{ кг/м}^3$, $E_h = 9 \text{ ГПа}$; параметры для воды, насыщающей пористую среду: $\rho_{l0}^0 = 1005 \text{ кг/м}^3$, $\mu_l = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $C_l = 1500 \text{ м/с}$.

На рис. 1 представлены графики зависимостей коэффициентов затухания и фазовых скоростей «медленной» (линии 1) и «быстрой» (линии 2) волн от частоты для случаев, когда водонасыщенность среды равна 0,1 (штриховые линии) и 0,2 (сплошные линии). Характерные размеры порового пространства здесь и далее приняты равными $a_0 = 10^{-3} \text{ м}$. Видно, что характер распространения «медленной» волны достаточно слабо зависит от значения водонасыщенности среды. Для «быстрой» волны коэффициент затухания растет с увеличением водонасыщенности (так, для приведенных на рисунке значений водонасыщенности коэффициент затухания отличается примерно в 4 раза). Фазовая скорость «быстрой» волны так же не зависит от водонасыщенности среды.

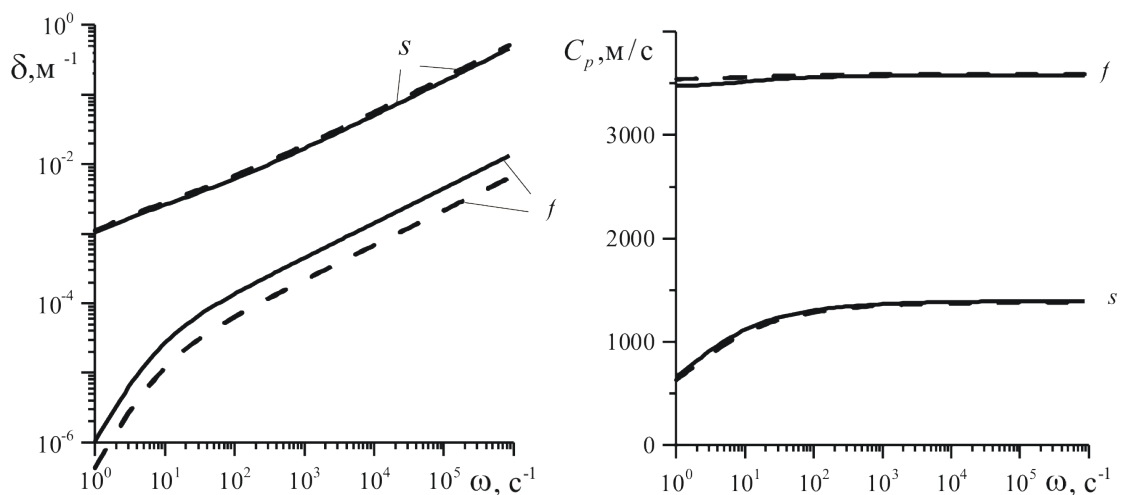


Рис. 1. Зависимость коэффициентов затухания и фазовых скоростей «медленной» и «быстрой» волн от частоты при разных объемных содержаниях воды (сплошные линии – 0,2, штриховые линии – 0,1). Буквы s (slow) и f (fast) соответствуют «медленной» и «быстрой» волне. Характерные размеры порового пространства $a_0 = 10^{-3} \text{ м}$.

На рис. 2 представлены зависимости модуля коэффициента отражения и его аргумента от частоты при переходе границы «вода – пористая среда, насыщенная водой». Сплошная и штриховая линии соответствуют объемному содержанию воды $\alpha_{l0}=0,2$ и $0,1$ соответственно. Из рис. 2 следует, что в диапазоне частот $1 < \omega < 100 \text{ с}^{-1}$ происходит уменьшение значения модуля коэффициента отражения и его аргумента. С увеличением частоты ($\omega > 100 \text{ с}^{-1}$) коэффициент отражения и его аргумент изменяются незначительно. Увеличение значения объемного содержания воды приводит к уменьшению модуля коэффициента отражения.

Значение аргумента $\beta_N^{(wp)}$ для всех рассмотренных частот лежит в диапазоне от 0 до 0,1, т.е. действительная часть коэффициента отражения $N^{(wp)}$ является положительной величиной при этих частотах. Это означает, что пористая среда является акустически более жесткой средой по сравнению с водой.

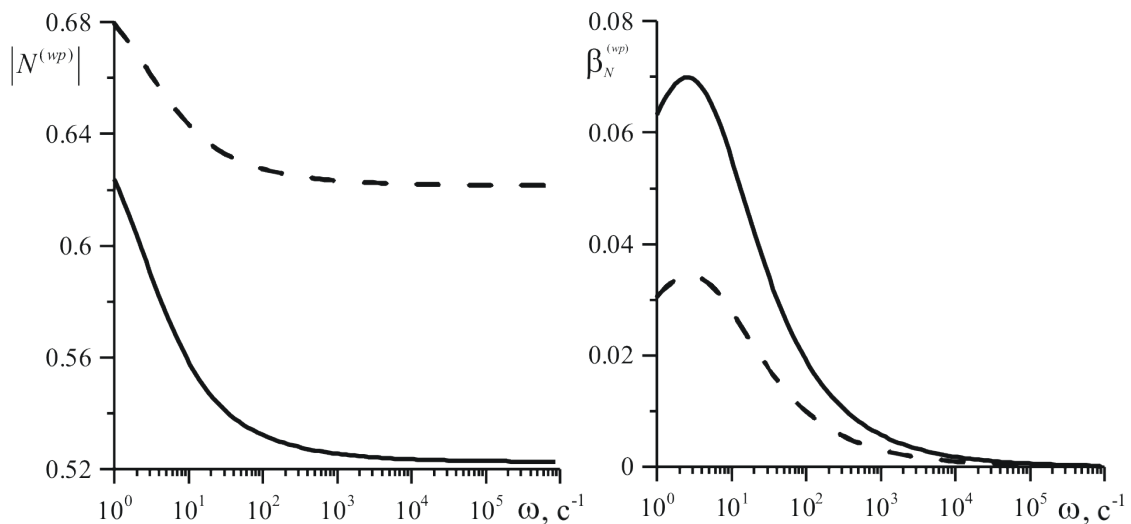


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента отражения и его аргумента от частоты для границы «вода–пористый гидрат» при разных водонасыщенностях среды (сплошные линии – 0,2, штриховые линии – 0,1). Характерные размеры порового пространства $a_0 = 10^{-3} \text{ м}$.

На рис. 3 представлены численные осциллограммы для условного датчика, расположенного в воде перед пористой средой, насыщенной водой, конечной толщины l . Сплошные линии соответствуют случаю, когда

пористая среда, насыщенная водой, толщиной l граничит с пористой средой, насыщенной гидратом, а сплошные линии - пористая среда, насыщенная водой, граничит с известняком. Водонасыщенность среды $\alpha_{i0}=0,1$. Толщина среды $l=0,4$ м.

Рис. 4 отличается только водонасыщенностью среды - 0,2.

При отражении «быстрой» волны от границы $x=l$ в пористой среде, насыщенной водой, возникают «медленная» и «быстрая» волны. При отражении «медленной» волны также возникают «медленная» и «быстрая» волны. Буквой f обозначен импульс, соответствующий «быстрой» волне, возникшей при отражении «быстрой» волны. Буквой s обозначен импульс, соответствующий «медленной» волне, возникшей при отражении «медленной» волны. Сочетанием букв fs обозначена сумма двух импульсов, соответствующих «быстрой» волне, возникшей при отражении «медленной» волны и «медленной» волне, возникшей при отражении «быстрой» волны.

Импульс давления, заданный в виде (16), инициируется в воде и падает на плоскую границу «вода–пористая среда, насыщенная водой» ($x=0$). Далее импульс частично отражается и частично проходит через эту границу. На рис. 3 исходный импульс давления обозначен цифрой 1. Цифрой 2 обозначен импульс, отраженный от границы $x=0$. Отраженный импульс описывается выражением (17). Прошедшая волна делится на две части: «быструю» и «медленную», которые можно определить с помощью формул (18) и (19). Распространение «быстрой» и «медленной» волн по пористому газогидрату описываются выражениями (20) и (21). Когда «быстрая» и «медленная» волны доходят до границы $x=l$, они полностью отражаются от этой границы и распространяются в обратном направлении к границе $x=0$. Отраженные волны можно получить с помощью формул (16) и (17), а их распространение в направлении к границе $x=0$ – по формулам (18) и (19). Пришедшие к границе «пористый гидрат – вода» «быстрая» и «медленная» волны частично проходят через эту границу и частично отражаются. Суммарную прошедшую волну можно определить с помощью формулы (20). Цифрой 3 на рис. 3

обозначены осциллограммы, прошедшей через границу «пористый гидрат – вода» волны.

Рис. 4 построен при значении водонасыщенности среды $\alpha_{l0}=0,4$. Остальные параметры такие же, как на рис. 3. Из сравнения рисунков 3 и 4 видно, что амплитудные значения импульсов, вернувшихся после взаимодействия с газогидратным пластом, зависят от водонасыщенности пласта. Увеличение водонасыщенности среды приводит к увеличению амплитуды «медленной» волны и к уменьшению амплитуды «быстрой» волны. Для рассматриваемых значений толщины l «быстрая» и «медленная» волны за время прохождения гидратного пласта слабо затухают.

Зная скорости «быстрой» и «медленной» волн и их времена прохождения от границы $x=0$ к границе $x=l$ и обратно, можно определить толщину газогидратного пласта. По амплитудам «медленной» и «быстрой» волн можно оценить водонасыщенность газогидратного пласта.

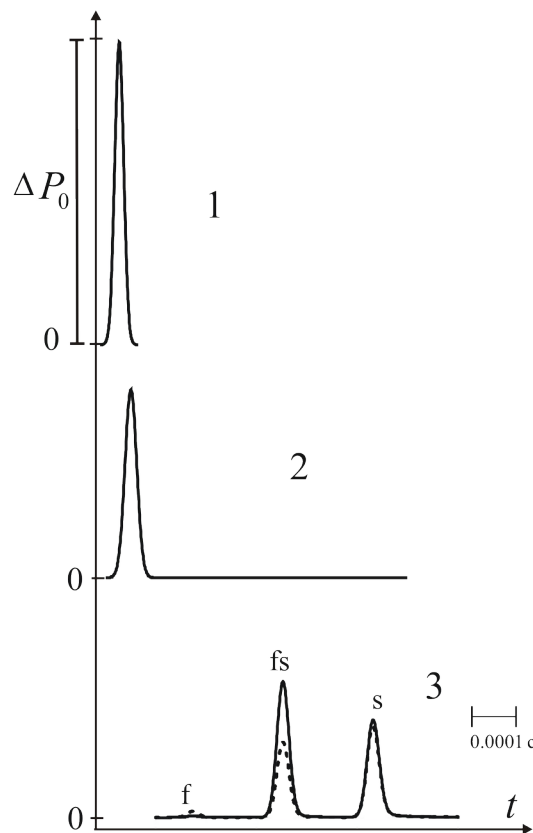


Рис. 3. Динамика эволюции импульса давления при прохождении газогидратного пласта. Сплошная и штриховая линии соответствуют толщине пласта $l=0.8$ и 0.4 м. Объемное содержание воды $\alpha_{g0}=0.2$. Линии f соответствуют «быстрой» волне, линии s – «медленной».

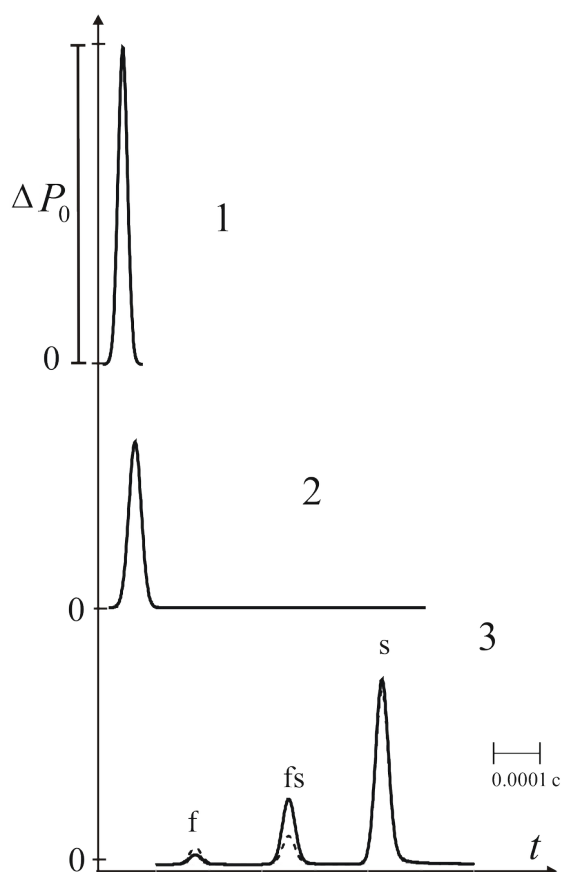


Рис. 4. Динамика эволюции импульса давления при прохождении газогидратных пластов толщиной 0,4 м (штриховые линии) и 0,8 м (сплошные линии) с водонасыщенностью 0,4. Линии f соответствуют «быстрой» волне, линии s – «медленной».

Закключение. На основе проведенных расчетов можно заключить, что по данным об отражении и прохождении волновым импульсом границ газогидратного пласта можно судить о его мощности (толщине), водонасыщенности, а также о размерах поровых включений. Это позволяет использовать акустические волны для идентификации и количественной оценки газогидратных залежей в донных отложениях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикаций FEUR - 2020 - 0004 «Решение актуальных задач и исследование процессов в нефтехимических производствах, сопровождающихся течениями многофазных сред».

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

a – радиус поры (м)

a_0 – средний радиус пор (м)

b – полутолщина стенки поры (м)

b_0 – средняя полутолщина стенки поры (м)

ρ_l – плотность воды (кг/м³)

ρ_h – плотность газогидрата (скелета) (кг/м³)

α_l – объемное содержание воды

α_h – объемное содержание газогидратной фазы (скелета)

v_l – скорость жидкой фазы (м/с)

v_h – скорость газогидратной фазы (скелета) (м/с)

C_p – средняя фазовая скорость (м/с)

C_l – фазовая скорость волны в воде (м/с)

C_h – фазовая скорость волны в скелете пористой среды (м/с)

δ – коэффициент затухания (м⁻¹)

K – комплексное волновое число (м⁻¹)

i – мнимая единица

ω – круговая частота (с⁻¹)

p_{l0} – давление в жидкой фазе в невозмущенном состоянии (Па)

p_l – давление в жидкой фазе (Па)

σ_h – напряжение в твердой фазе (скелете) (Па)

E_h – модуль упругости материала пористого скелета (Па)

ε – деформация

F_m – сила присоединенных масс

F_μ – аналог силы вязкого трения Стокса

F_B – сила Бассэ

μ_l – динамическая вязкость воды (Па · с)

μ_h – коэффициент вязкости скелета пористой среды (Па · с)

ν_l – кинематическая вязкость воды (м²/с)

x – координата (м)

t – время (с)

τ – переменная интегрирования

η_m, η_μ, η_B – коэффициенты, зависящие от параметров пористой среды

Нижние индексы:

h, l – параметры, относящиеся к газогидрату (скелету пористой среды) и воде

O – параметры начального состояния

Верхние индексы:

O – параметры, соответствующие истинному значению

Список литературы

1. **Makogon Y.F.** Natural gas hydrates – a promising source of energy. *J. Natural Gas Science and Eng.* 2010. №2. P. 49-59.
2. **Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г.** Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи. Транспортировки и хранения газа. –М.: Наука, 2016. –240 с.
3. **Цыпкин Г.Г.** О режимах диссоциации газовых гидратов в высокопроницаемых пластах. *Инженерно-физический журнал*. 1992. Т. 63, № 6. С. 714-721.
4. **Цыпкин Г.Г.** Математическая модель диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в пластах. *Доклады РАН*. 2001. Т. 381, № 1. С. 56-59. Зачем нам нужен Цыпкин?
5. **Шагапов В.Ш., Насырова Л.А.** О нагреве пористой среды, частично заполненной газогидратом, при наличии непроницаемых границ. *Теплофизика высоких температур*. 1999. Т. 37, № 5. С. 784-789.
6. **Шагапов В.Ш., Насырова Л.А., Потапов А.А., Дмитриев В.Л.** Тепловой удар под воздействием энергии излучения на пористую среду, частично заполненную газогидратом. *Инженерно-физический журнал*. 2003. Т. 76, № 5. С. 47-53.
7. **Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К. Столповский М.В.** Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа. *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 3. С. 347-354.
8. **Шагапов В.Ш., Хасанов М.К.** Режимы восстановления метана из газогидрата при инъекции «теплого» диоксида углерода в пористую среду. *Теплофизика высоких температур*. 2017. Т. 55, № 5. С. 753-761.
9. **Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л., Хасанов М.К.** Динамика разложения газовых гидратов в пористой среде с учетом формирования льда. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-*

математическое моделирование. *Нефть, газ, энергетика*. 2017. Т. 3, № 1. С. 46-57.

10. **Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г.** Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инъекции холодного газа. *Прикладная механика и техническая физика*. 2008. Т. 49, №3. С. 462-472.
11. **Хасанов М.К. Гималтдинов И.К., Столповский М.В.** Особенности образования газогидратов при нагнетании холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой. *Теоретические основы химической технологии*. 2010. Т. 44, № 4. С. 442–449.
12. **Хасанов М.К., Столповский М.В., Кильдибаева С.Р.** Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде при инъекции газа. *Вестник Башкирского университета*. 2013. Т. 18, № 4. С. 969–972.
13. **Хасанов М.К.** Математическое моделирование образования газогидрата сероводорода при его инъекции в пласт, насыщенный нефтью и водой. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2017. № 4. С. 215-218.
14. **Хасанов М.К.** Режимы гидратообразования при инъекции углекислого газа в пористую среду, насыщенную метаном и водой. *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91, № 4. С. 922-931.
15. **Хасанов М.К., Столповский М.В., Гималтдинов И.К.** Моделирование образования газогидрата при инъекции углекислого газа в природный пласт. *Прикладная механика и техническая физика*. 2018. Т. 59, № 3. С. 94-102.
16. **Хасанов М.К.** Математическое моделирование гидратообразования при закачке сероводорода в истощенное месторождение нефти. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2019. № 10. С. 59-62.

17. **Шагапов В.Ш., Уразов Р.Р.** Характеристика газопровода при наличии гидратоотложения. *Теплофизика высоких температур*. 2004. Т. 42, № 3. С. 461-468.
18. **Уразов Р.Р., Чиглинцев И.А., Насыров А.А.** Образование склеротических отложений гидрата в трубе для отбора газа из купола-сепаратора. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т. 90, № 5. С. 1223-1231.
19. **Тохидаи Б., Андерсон Р., Масоуди А., Арджманди Дж., Бургасс Р., Янг Дж.** Газогидратные исследования в университете Хериот-Ватт (Эдинбург). *Российский химический журнал*. 2003. Т. 47, № 3. С. 49-58.
20. **Донченко С.И.** Гидроакустические признаки газогидратов и возможности их учета при моделировании среды. *Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана): Сб. науч. тр. – Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины*. 2009. № 6. С. 36-51.
21. **Дунин С.З., Нагорнов О.В.** Особенности прохождения упругих волн через пористые насыщенные среды. *Сб. трудов научной сессии «МИФИ-2007»*. М.: МИФИ. 2007. Т. 5. С. 55.
22. **Крючкова В.В.** Акустические волны в пористых флюидонасыщенных средах: компьютерное моделирование на мезоуровне. *Физическая мезомеханика*. 2000. Т. 3., № 3. С. 87-92.
23. **Марков М.Г.** Отражение упругих волн на границе раздела жидкостей в пористых средах. *Физика Земли*. 2009. № 9. С. 41-47.
24. **Мусаев Н.Д.** К двухскоростной механике зернистых пористых сред. *Прикладная математика и механика*. 1985. Т. 49, № 2. С. 334-336.
25. **Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л.** Распространение линейных волн в насыщенных газом пористых средах с учетом межфазного теплообмена. *Прикладная механика и техническая физика*. 2004. Т. 45, № 4. С. 114–120.

26. Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. [Исследование эволюции волнового импульса при прохождении через пористую преграду // Прикладная механика и техническая физика](#). 2011. Т. 52. № 5 (309). С. 136-145.
27. Гималтдинов И.К., Ситдикова Л.Ф., Дмитриев В.Л., Левина Т.М., Хабеев Н.С., SongWanqing. Отражение звуковых волн от пористого материала в случае наклонного падения. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т. 90, №5. С. 1098–1108.
28. Гималтдинов И.К., Дмитриев В.Л. Динамика акустических волн в пористой среде, частично насыщенной газовым гидратом. *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92, № 6. С. 2466-2474.
29. Шагапов В.Ш. Влияние тепломассообменных процессов между фазами на распространение малых возмущений в пене. *Теплофизика высоких температур*. 1985. Т. 23, № 1. С. 126–132.
30. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. *Механика насыщенных пористых сред*. Москва: Недра, 1970.
31. Нигматулин Р.И. *Основы механики гетерогенных сред*. Москва: Наука, 1978.
32. Нигматулин Р.И. *Динамика многофазных сред. Ч.1*, Москва: Наука, 1987.
33. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. *Российский химический журнал*. 2003. Т. 47, № 3. С. 70-79.